

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Pompa Hidram (*Hydraulic Ram Pump*)

*Hydraulic ram pump* atau bisa disebut juga sebagai pompa hidram adalah pompa yang sudah digunakan melebihi se abad, yang berfungsi untuk menaikkan air melebihi 100 meter. Pompa ini sederhana dan efektif digunakan pada kondisi sesuai dengan syarat-syarat yang diperlukan untuk operasinya. Dalam kerjanya alat ini, tekanan dinamik air yang ditimbulkan memungkinkan air mengalir dari tinggi vertikal (*head*) yang rendah ke tempat yang lebih tinggi. Penggunaan hidram tidak terbatas hanya pada penyediaan air untuk kebutuhan rumah tangga, tapi juga dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan air untuk pertanian, peternakan dan perikanan darat. Di beberapa daerah pedesaan di Jepang alat ini telah banyak digunakan sebagai alat penyediaan air untuk kegiatan pertanian maupun untuk keperluan domestic (Hanafie, 1979).

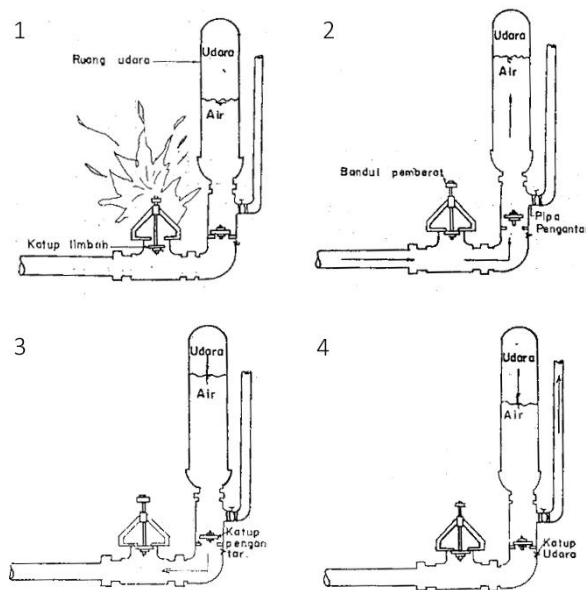
Dalam operasinya, alat ini mempunyai keuntungan dibandingkan dengan jenis pompa lainnya, antara lain; tidak membutuhkan sumber tenaga tambahan, biaya operasinya murah, tidak memerlukan pelumasan, hanya mempunyai dua bagian yang bergerak sehingga memperkecil terjadinya keausan, perawatannya sederhana dan dapat bekerja dengan efisien pada kondisi yang sesuai serta dapat dibuat dengan peralatan bengkel yang sederhana.

Prinsip kerja pompa hidram adalah merupakan perubahan energi atau konversi energi dari energi kinetis aliran air menjadi tekanan dinamik dan sebagai akibatnya menimbulkan palu air (*water hammer*) sehingga terjadi tekanan tinggi dalam pipa.

Dengan mengusahakan supaya katup limbah (*waste valve*) dan katup pengantar (*delivery valve*) terbuka dan tertutup secara bergantian, maka tekanan dinamik diteruskan sehingga tekanan inersia yang terjadi dalam pipa pemasukan memaksa air naik ke pipa pengantar (gambar 2.1).

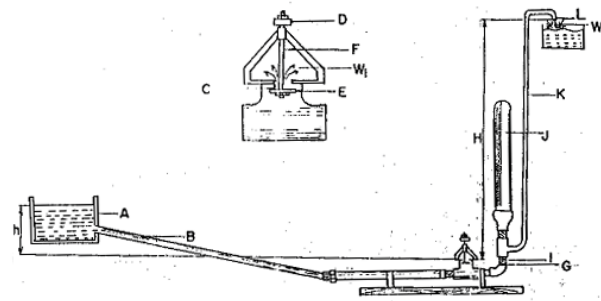
Bagian bagian utama yang menyusun alat ini terdiri dari :

1. Pipa pemasukan (*drive pipe*)
2. Pipa pengeluaran atau pipa pengantar (*delivery pipe*)
3. Katup limbah (*waste valve*)
4. Katup pengantar (*delivery valve*)
5. Katup udara (*air valve*)
6. Ruang udara (*air chamber*).



Gambar 2.1, Kerja pompa hidram (*ram pump*)

Sumber : Hanafie, Jahja, Teknologi Pompa Hidraulik Ram, hal 3



#### Keterangan

- A. Tongki pemasukan
- B. Pipa pemasukan
- C. Lubang katup limbah
- D. Pemberat katup limbah
- E. Katup limbah
- F. Tongkal katup limbah
- G. Katup udara
- I. Katup pengantar
- J. Ruang udara
- K. Pipa pengantar
- L. Lubang pengeluaran pipa pengantar
- H. Tinggi vertikal antara lubang katup limbah dengan lubang pengeluaran pipa pengantar
- h. Tinggi vertikal antara permukaan air dalam tongki pemasukan dengan lubang katup limbah
- W<sub>1</sub>. Debit air yang terbuang melalui katup limbah
- W<sub>2</sub>. Debit pompa

Gambar 2.2, Instalasi pompa hidram

Sumber : Hanafie, Jahja, dkk, Teknologi Pompa Hidraulik Ram, hal 4

Penggunaan pompa hidram dapat memberikan banyak manfaat, diantaranya:

- a) Untuk mengairi sawah dan ladang ataupun areal perkebunan yang membutuhkan pasokan air secara berkesinambungan. Hal ini cocok diterapkan di daerah pertanian dan persawahan tadah hujan yang tidak terjangkau oleh jaringan irigasi dan terletak di tempat yang lebih tinggi daripada sumber air, karena pompa hidram dapat memompa air dari bawah ke tempat yang lebih tinggi dalam jumlah yang memadai,
- b) Untuk mengairi kolam dalam usaha perikanan atau tambak,
- c) Mampu menyediakan air pada usaha peternakan,

- d) Mampu memasok air untuk kebutuhan industri atau pabrik-pabrik pengolahan,
- e) Air yang dihasilkan dapat menggerakkan turbin yang berputar karena kekuatan air yang masuk dari pompa hidram, sehingga mampu menghasilkan listrik bila dihubungkan dengan generator

## 2.2 Bagian-Bagian *Hydraulic Ram Pump*

Dalam konstruksi pompa hidram, ada beberapa bagian atau komponen pada pompa yang sangat menentukan bisa atau tidaknya pompa bekerja sesuai dengan syarat syarat yang ada dilingkungan pemasangan pompa. Bagian bagian pompa harus memiliki akurasi yang baik agar pompa hidram dapat bekerja dengan effisiensi yang sesuai karakteristiknya

### 2.2.1 Pipa pemasukan (*drive pipe*)

Diameter dan panjang pipa pemasukan (*drive pipe*) sangat penting dalam mempengaruhi kinerja pompa hidram. Untuk mengetahui kualitas dimensi pipa pemasukan yang paling tepat digunakan untuk konstruksi pompa hidram maka dapat digunakan persamaan rasio dari panjang pipa (L) dan diameter pipa (D) yang mana Batasan perbandingan tersebut harus di antara 150 sampai 1000 dan juga rasio antara panjang pipa (L) dan *supply head* (H) harus bernilai di antara 3-7 ( Watt, 1975 ).

$$\frac{L}{D} = 150 - 1000 \quad (1)$$

$$\frac{L}{H} = 3 - 7$$

Visikositas air dan gesekan pada dinding pipa (*friction*) juga dipengaruhi oleh diameter pipa pemasukan dimana rasio yang hampir sama antara pipa dan volume air akan membuat visikositas air dan gesekan yang terjadi semakin membesar yang otomatis akan menurunkan kecepatan aliran air dan mereduksi efisiensi pompa hidram. Pipa pemasukan juga dapat menentukan pipa pengantar (*drive pipe*) dimana pada tabel 1 menunjukkan perbandingan antara pipa pemasukan dan pipa pengantar sesuai penelitian yang dilakukan PTP-ITB ( Hanafie, 1979 ).

Tabel 2.1: Perbandingan diameter pipa pemasukan dan pipa pengantar.

TYPE	Garis tengah dalam pipa pemasukan (inci)	Garis tengah dalam pipa pengeluaran (inci).
1	1.50	0.75
2	2.00	1.00
3	3.00	1.50
4	4.00	2.00
5	5.00	3.00

Sumber : Hanafie, Jahja, dkk, Teknologi Pompa Hidraulik Ram, hal 9

### 2.2.2 Pipa pengantar (*delivery pipe*)

Hidram dapat memompa air pada ketinggian yang cukup tinggi. Dengan menggunakan pipa pengantar (*delivery pipe*) yang panjang akan menyebabkan ram harus mengatasi gesekan antara air dengan dinding pipa. Pipa pengantar dapat dibuat dari bahan apapun,

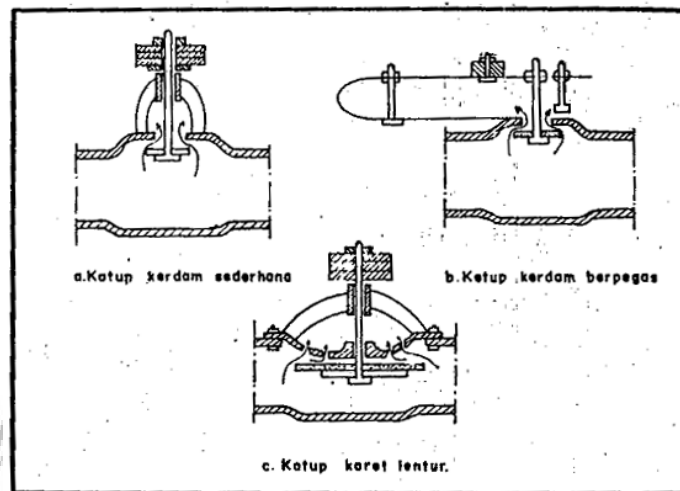
termasuk pipa plastik tetapi dengan syarat bahan tersebut dapat menahan tekanan dinamik air.

### 2.2.3 Katup limbah (*waste valve*)

Katup limbah merupakan salah satu komponen terpenting pompa hidram, oleh sebab itu katup limbah harus dirancang dengan baik sehingga berat dan gerakannya dapat disesuaikan. Katup limbah sendiri berfungsi untuk mengubah energi kinetik fluida kerja yang mengalir melalui pipa pemasukan menjadi energi tekanan dinamis fluida yang akan menaikkan fluida kerja menuju tabung udara (Hanafie, 1979 ).

Katup limbah dengan beban yang berat dan panjang langkah yang cukup jauh memungkinkan fluida mengalir lebih cepat, sehingga saat katup limbah menutup, akan terjadi lonjakan tekanan yang cukup tinggi, yang dapat mengakibatkan fluida kerja terangkat menuju tabung udara. Sedangkan katup limbah dengan beban ringan dan panjang langkah lebih pendek, memungkinkan terjadinya denyutan yang lebih cepat sehingga debit air yang terangkat akan lebih besar dengan lonjakan tekanan yang lebih kecil.

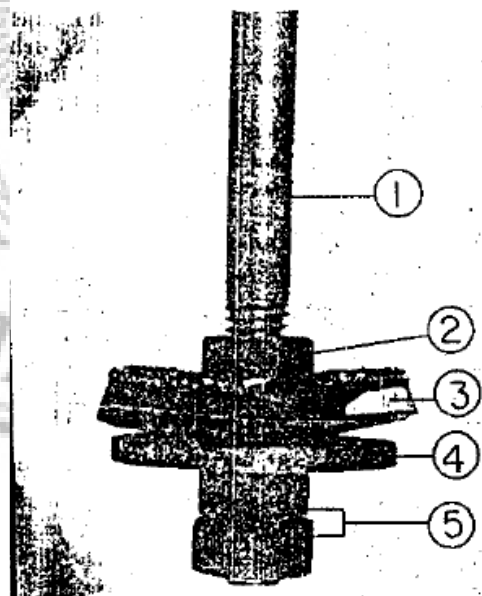
Beberapa desain katup limbah yang sering digunakan diantaranya:



Gambar 2.3, Beberapa jenis katup limbah (*waste valve*).

Sumber : Hanafie, Jahja, dkk, Teknologi Pompa Hidraulik Ram, hal 10

Adapun bagian – bagian sebuah katup limbah dapat dilihat dari gambar dibawah ini:



Gambar 2.4, Bagian – Bagian Katup Limbah.

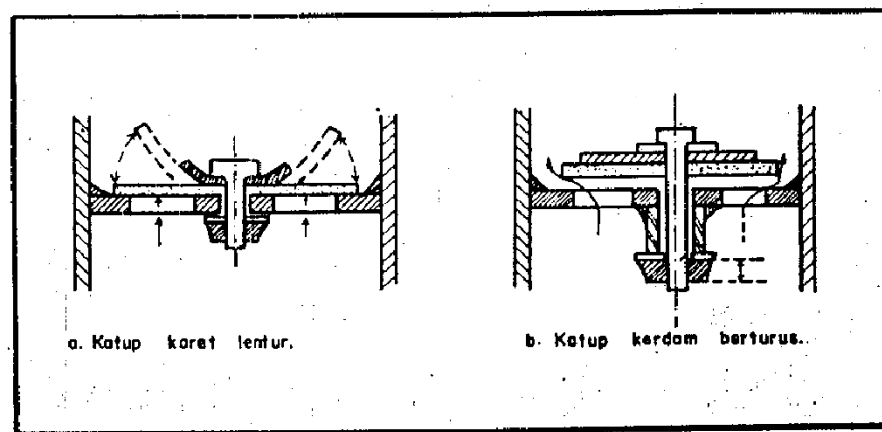
Sumber : Hanafie, Jahja, dkk, Teknologi Pompa Hidraulik Ram, hal 10

Keterangan gambar :

- 1) Tangkai Katup
- 2) Mur Penjepit Atas
- 3) Karet Katup
- 4) Plat Katup
- 5) Mur Penjepit Bawah

#### 2.2.4 Katup pengantar (*delivery valve*)

Katup pengantar (*delivery valve*) harus mempunyai lubang besar sehingga memungkinkan air yang dipompa memasuki ruang udara (*air chamber*). Katup ini dapat dibuat dengan bentuk yang sederhana yang dinamakan katup searah (*non return*), katup ini dibuat dari karet kaku dan bekerja seperti pada katup kerdam (gambar 2.5) (Hanafie, 1979).



Gambar 2.5, Beberapa jenis katup pengantar (*delivery valve*).

Sumber : Hanafie, Jahja, dkk, Teknologi Pompa Hidraulik Ram, hal 14



### 2.2.5 Ruang udara (*air chamber*)

Ruang udara harus dibuat sebesar mungkin untuk memampatkan udara dan menahan tegangan tekanan (*pressure pulse*) dari siklus ram, memungkinkan aliran air secara tetap melalui pipa pengantar dan kehilangan tenaga karena gesekan diperkecil.

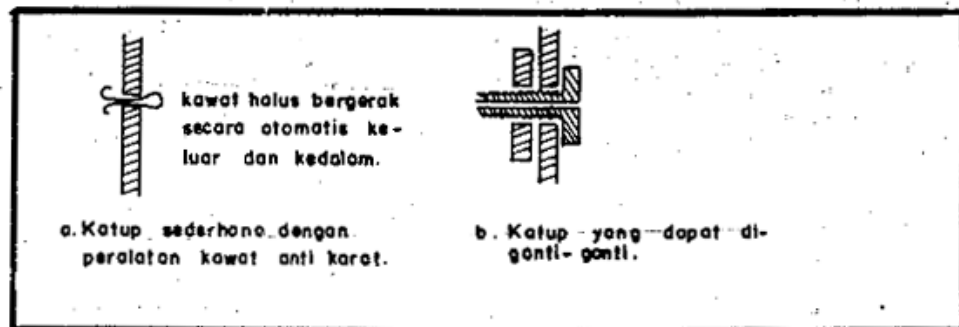
Jika ruang udara penuh air, ram akan bergetar keras dan dapat mengakibatkan ruang udara pecah. Jika hal ini terjadi ram harus dihentikan dengan segera. Beberapa ahli menyarankan bahwa volume ruang udara harus sama dengan volume air dalam pipa pengantar. Pada pipa pengantar yang panjang hal ini akan membutuhkan ruang udara yang terlalu besar dan untuk itu sebaiknya dirancang ruang udara dengan ukuran yang kecil ( Hanafie, 1979 ).

### 2.2.6 Katup udara (*air valve*)

Udara yang tersimpan dalam ruang udara diisap perlahan-lahan oleh turbulensi air yang masuk melalui katup pengantar dan hilang ke dalam pipa pengantar. Udara ini harus diganti dengan udara baru melalui katup udara (Gambar 2.6).

Katup udara harus disesuaikan sehingga mengeluarkan semprotan air yang kecil setiap terjadi denyutan kompresi. Jika katup udara terbuka terlalu besar, maka ruang udara terisi dengan udara dan air akan memompa udara. Jika katup kurang terbuka sehingga memungkinkan masuknya udara yang cukup banyak maka hidram

akan bergetar. Keadaan ini harus diperbaiki dengan memperkecil lubang udara ( Hanafie, 1979 ).



Gambar 2.6, Katup udara (*air valve*)

Sumber : Hanafie, Jahja, dkk, Teknologi Pompa Hidraulik Ram, hal 14

### 2.3 Mekanisme *Hydraulic Ram Pump*

Air mengalir dari suatu sumber atau sebuah tangki melalui pipa pemasukan dan keluar melalui katup limbah (*waste valve*). Aliran air yang keluar melalui katup limbah cukup cepat, maka tekanan dinamik yang merupakan gaya ke atas mendorong katup limbah sehingga tertutup secara tiba-tiba sambil menghentikan aliran air dalam pipa pemasukan (*drive pipe*). Aliran air yang terhenti mengakibatkan tekanan tinggi terjadi secara tiba-tiba dalam ram, jika tekanan cukup besar akan mengatasi tekanan dalam ruang udara (*air chamber*) pada katup pengantar (*delivery valve*) dengan demikian membiarkan air mengalir ke dalam ruang udara dan seterusnya ke tangki penampungan.

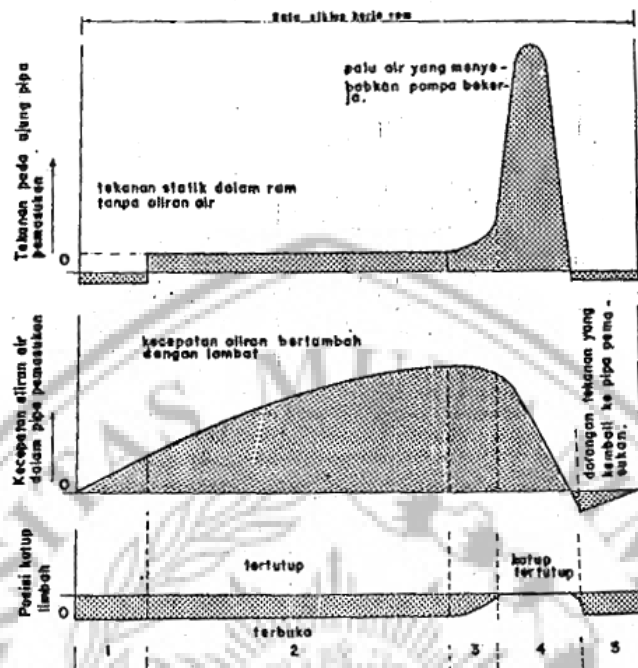
Gelombang tekanan atau “*hammer*” dalam ram sebagian dikurangi dengan lolosnya air ke dalam ruang udara dan denyut tekanan melompat kembali ke pipa pemasukan mengakibatkan hisapan di dalam badan ram. Hal ini menyebabkan katup pengantar menutup kembali dan menghalangi mengalirnya air kembali ke dalam ram. Katup limbah turun atau terbuka dan air sumber air melalui pipa pemasukan mengalir ke luar dan siklus tadi terulang lagi.

Sejumlah kecil udara masuk melalui katup udara (*air valve*) selama terjadi hisapan pada siklus tersebut. Air masuk ke dalam ruang udara melalui katup pengantar pada setiap gelombang air yang masuk ke dalam ruang udara. Ruang udara diperlukan untuk meratakan perubahan tekanan yang drastic dalam hidram. Udara dimampatkan dalam ruang dan secara kontinyu terjadi pergantian dengan udara baru yang masuk melalui katup udara, sebab ada sebagian udara yang telah dimampatkan bersama dengan air ke luar melalui pipa pengantar, dan selanjutnya ke tangki penampungan.

Dengan mengatur berat katup limbah dan jarak antara lubang katup dengan lubang limbah, di harapkan hidram dapat memompa air sebanyak mungkin dan biasanya terjadi bila siklus kira-kira 75 kali tiap menitnya. Pada gambar 2.7 diperlihatkan diagram siklus yang menunjukan satu siklus denyut tekanan dari hidram.

Periode 1.      Akhir siklus yang sebelumnya, kecepatan air melalui ram mulai bertambah, air melalui katup limbah yang sedang terbuka, timbul tekanan negative yang kecil dalam hidraulik ram.

- Periode 2. Aliran bertambah sampai maksimum melalui katup limbah yang terbuka dan tekanan dalam pipa pemasukan juga bertambah secara bertahap.
- Periode 3. Katup limbah mulai menutup dengan demikian menyebabkan naiknya tekanan dalam hidraulik ram. Kecepatan aliran dalam pipa pemasukan telah mencapai maksimum.
- Periode 4. Katup limbah tertutup, menyebabkan terjadinya palu air (*water hammer*) yang mendorong air melalui katup pengantar. Kecepatan aliran pipa pemasukan berkurang dengan cepat.
- Periode 5. Denyut tekanan terupukul ke dalam pipa pemasukan, menyebabkan timbulnya hisapan kecil dalam hidraulik ram. Katup limbah terbuka karena hisapan tersebut dan juga karena beratnya sendiri. Air mulai mengalir lagi melalui katup limbah dan skilus hidraulik ram terulang lagi ( Hanafie, 1979 ).



Gambar 2.7, Diagram satu siklus kerja pompa hidram.

Sumber : Hanafie, Jahja, dkk, Teknologi Pompa Hidraulik Ram, hal 6

## 2.4 Karakteristik *Hydraulic Ram Pump*

Karakteristik dari sebuah pompa hidram yang bekerja pada keadaan dimana jarak antara lubang dan katup limbah (*waste valve*) bernilai konstan, tinggi vertikal tangki pemasukan (*supply head*) tetap sedang tinggi pemompaan berubah-ubah.

Penelitian yang telah dilakukan pada sebuah hidram ukuran kecil, dimana tinggi vertikal tangka pemasukan (*supply head*) adalah 1,58 m dan tinggi pemompaan (*delivery head*) adalah 3 m. Hasil penelitian menunjukkan betapa efektifnya penyetelan pada katup limbah terhadap kerja hidraulik ram. Data yang diperoleh

tentang pengaruh penyetelan katup limbah terhadap denyutan katup dan nilai effesien dari hidraulik ram tercantum pada Tabel 2.2 di bawah ini.

Tabel 2.2: Performa pompa hidram dari denyutan katup limbah

**"Performance" hidraulik ram dengan jarak katup limbah yang bervariasi (menurut Addison, 1964).**

Jumlah denyutan tiap menit.	Air yang terbangun (W) (kg/menit)	Debit pemompaan (We) (kg/menit)	Effisiensi	
			R1)	R2)
92	32.0	7.36	0.44	0.54
110	23.6	6.28	0.51	0.61
157	13.0	4.09	0.59	0.69

- 1) Efisiensi "Ranghine"  
2) Efisiensi "D'Aubuisson"

Sumber : Hanafie, Jahja, dkk, Teknologi Pompa Hidraulik Ram, hal 7

## 2.5 Mekanika Fluida

Mekanik fluida merupakan salah satu cabang tertua dari ilmu fisika dan merupakan pondasi bagi pengetahuan dan aspek lain ilmu terapan dan keteknikan (*engineering*) yang memperhatikan gerakan dan keseimbangan fluida. Ilmu ini merupakan suatu subjek yang mendasari hampir semua bidang keteknikan seperti; *mechanical engineering, civil engineering, aerospace, naval architecture, marine engineering* serta bidang-bidang lain seperti; *astrophysics, biology, biomedicine, plasma-physics*.

Studi mengenai seluruh aspek tingkah laku fluida kemudian dapat dibagi menjadi tiga kategori; statika fluida, kinematika fluida dan dinamika fluida. Pada

kasus pertama, elemen fluida berada pada keadaan relative terhadap lainnya sehingga bebas dari tegangan geser (*shear stress*). Distribusi-distribusi tekanan statis dalam suatu fluida dan pada benda-benda yang tenggelam didalam suatu fluida dapat ditentukan dari analisa statika.

Kinematika fluida berhubungan dengan studi mengenai translasi, rotasi dan rate deformasi dari suatu partikel fluida. Analisa ini berguna dalam menentukan metode yang menggambarkan gerakan suatu partikel dan dalam menganalisa bentuk aliran. Selanjutnya, perlu untuk mengadakan Analisa dinamis bagi suatu gerakan fluida untuk menentukan efek-efek fluida tersebut beserta lingkungannya terhadap gerakan.

Analisa dinamis meliputi pertimbangan terhadap gaya-gaya yang bekerja pada partikel-partikel fluida yang bergerak. Karena adanya gerakan relative dari partikel-partikel, maka gaya geser menjadi penting dalam Analisa tersebut ( Orianto, 1989 )

## 2.6 Jenis aliran fluida

Ada dua jenis aliran fluida; laminar dan turbulen yang pertama kali diperlihatkan oleh Osborn Reynold pada tahun 1883. Ketika suatu fluida didalam tabung-tabung memperlihatkan bahwa partikel-partikel fluida bergerak mengalir dalam keadaan sejajar dan lurus maka keadaan aliran disebut sebagai aliran laminar yang mengartikan aliran dalam keadaan stabil atau *steady*.

Tetapi begitu kecepatan fluida dinaikan maka bentuk aliran fluida didalam tabung-tabung menjadi berubah. Pertama fase fluida dalam bentuk-bentuk bergelombang, kemudian pada daerah dekat *entrance* menjadi putus menjadi sejumlah pusaran atau *vortices*. Aliran tersebut dinamai sebagai aliran fluida turbulen

dimana keadaan fluida tidak stabil mengalir dalam suatu tabung atau *unsteady*. Pada gambar 2.8 dan 2.9 menunjukkan perbedaan aliran laminar dan turbulensi.

Untuk suatu kasus normal dari suatu aliran yang mengalir dalam pipa lurus yang diameternya uniform dan kekasarannya normal maka aliran tetap dalam kondisi laminar pada angka Reynold dibawah 2000. Lebih dari nilai tersebut aliran akan menjadi turbulen, adapun besarnya angka Reynold dapat dicari dengan persamaan berikut:

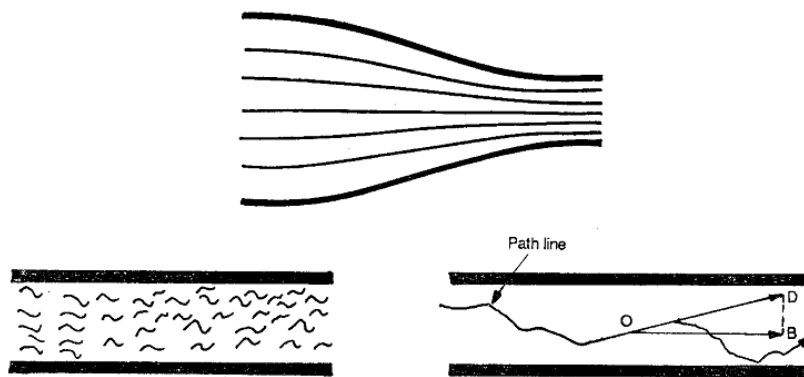
$$Re = \frac{DV}{\nu} \quad (2)$$

dimana:

$D$  = diameter pipa (m)

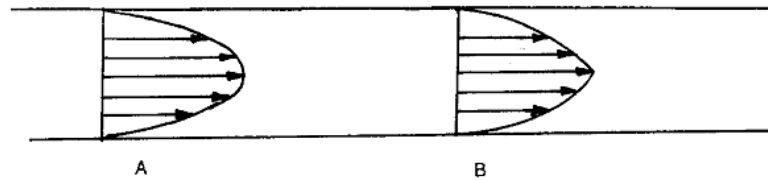
$V$  = kecepatan aliran dalam pipa (m/s)

$\nu$  = visikositas fluida ( $\text{kgs/m}^2$ )



Gambar 2.8, Aliran turbulensi.





Gambar 2.9, Aliran laminar.

Sumber : Orianto, Mekanika Fluida I, hal 28 – 29

## 2.7 Palu air (*water hammer*)

Bayangkan dalam sebuah sistem perpipaan, pipa yang terisi fluida mengalir didalamnya. Sistem perpipaan dapat memiliki berbagai macam perangkat, seperti katup, pompa, *reservoir*, tangki, *inlet* udara, dll yang mana perangkat perangkat ini dapat mempengaruhi aliran fluida.

Aliran fluida terkhusus pada fluida tak termampatkan (*incompressible fluid*) dalam pipa dapat dalam keadaan stabil/laminar atau tidak stabil/turbulen. Pada aliran yang stabil, aliran tidak ada perubahan fenomena terhadap waktu. Tapi biasanya aliran yang memiliki beragam perubahan properti nilai tekanan dan kecepatan adalah saat aliran kondisi turbulen atau tidak stabil.

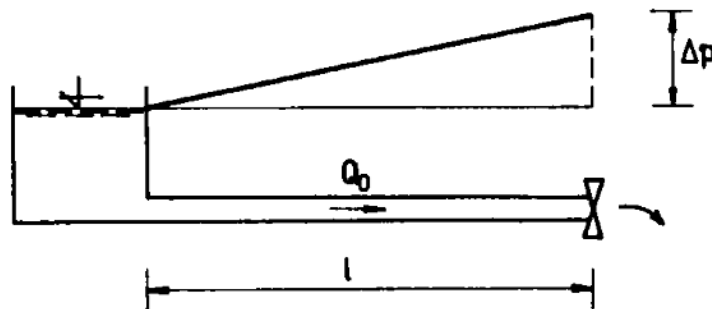
Aliran turbulen atau aliran yang tidak stabil dapat menghasilkan perubahan cepat tekanan dan kecepatan fluida (*rapid velocity and pressure changes*), fenomena perubahan cepat pada properti fluida air ini umumnya disebut sebagai palu air atau *water hammer*. Dalam fenomena *water hammer*, dapat diasumikan beberapa pendukung penyebab dapat timbulnya *water hammer* yaitu sifat fluida yang harus bersifat tak termampatkan (*incompressible fluids*) dan kekakuan atau rigiditas bahan

dari saluran pipa. Untuk persamaan yang digunakan dalam menghitung atau menentukan nilai tekanan palu air atau *water hammer* yang terjadi khusus pada fluida tak termampatkan (*incompressible fluids*) maka dapat dijeaskan pada sub judul (2.5.7) ini, yaitu a. Prinsip Fisika *water hammer* untuk fluida tak termampatkan (*incompressible fluids*), b. Pemampatan Fluida *Liquid (Bulking)*, dan c. Kecepatan Gelombang Supersonik, (Zabura.J; 1993).

**a. Prinsip fisika *water hammer* untuk fluida tak termampatkan**

*Water hammer* atau palu air dalam banyak kasus umumnya banyak terjadi pada fluida tak termampatkan (*incompressible fluids*) dan saluran pipa yang rigid/kaku.

Pada gambar 2.10 adalah permodelan bagaimana *water hammer* terjadi pada suatu sistem perpipaan horizontal yang di akhir saluran di pasang perangkat berupa katup atau *valve*. Di asumsikan bahwa kerugian tekanan (*pressure losses*) tidak ada,  $Q_0$  adalah debit fluida,  $A$  adalah luas dari saluran pipa dengan refrensi diameter dalam pipa,  $L$  adalah panjang pipa dari tangki/*reservoir*, dan  $\rho$  adalah massa jenis fluida.



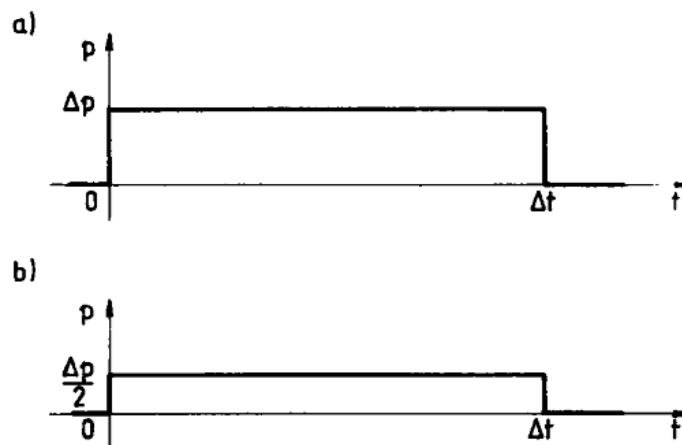
Gambar 2.10, Permodelan water hammer sederhana.

Sumber : Zabura, J, Water Hammer in Pipe-Line Systems, Hal 22

Kemudian pada sistem tersebut, katup ditutup dengan interval waktu yang sesuai. Selama interval atau periode penutupan katup sampai saluran pipa benar benar tertutup, tekanan pada katup akan meningkat secara cepat atau *rapid* ( $\Delta P$ ). Perubahan pada momentum fluida dalam pipa akan sama dengan momentum yang diberikan pada fluida oleh perbedaan pada tekanan hulu dan hilir di akhir saluran selama interval atau periode tertentu ( $\Delta t$ ). Fenomena ini dapat di nyatakan dalam persamaan,

$$\Delta P = \frac{\rho \cdot v}{\Delta t} \quad (3)$$

Sebuah diagram menggambarkan variasi tekanan ( $\Delta P$ ), sesuai dengan fungsi dari interval, periode atau waktu ( $t$ ) pada katup dan pada titik tengah saluran pipa yang di modelkan pada gambar 2.11 di bawah ini.



Gambar 2.11, Pengaruh variasi waktu ( $t$ ) terhadap tekanan ( $P$ ) untuk fluida tak termampatkan, (a) pada katup; (b) titik tengah pada sistem saluran pipa.

Sumber : Zabura, J, Water Hammer in Pipe-Line Systems, hal 23

Persamaan (3) dapat digunakan untuk menentukan kenaikan tekanan ( $\Delta P$ ) hanya selama penutupan katup di sistem pipa, jika penutupan katup atau *valve* memerlukan waktu tertentu yang cukup lama dan perubahan yang terjadi adalah perubahan linear.

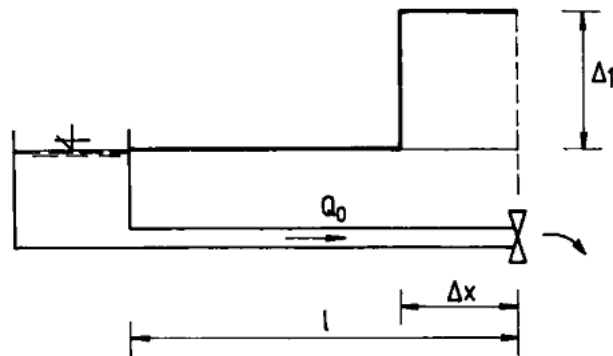
Untuk sebuah penutupan katup dengan periode cepat ( $\Delta t \rightarrow 0$ ), maka tekanan jika sesuai dengan persamaan (3) akan bertambah tak terbatas/ *infinitely* ( $\Delta P \rightarrow \infty$ ), yang mana hal ini tidak sesuai dengan realita atau kejadian nyatanya. Alasan utama untuk kontradiksi ini ada pada kemampuan kompresibilitas fluida atau liquid yang biasanya diisitlahkan sebagai *bulk modulus/* modulus pemampatan (K) dan juga elastisitas bahan dari sistem saluran pipa (e), yang mana keduanya akan mewujudkan perubahan cepat tekanan yang menyebabkan *water hammer*, (Zabura.J; 1993).

#### **b. Pemampatan fluida liquid (*Bulking*)**

Mempertimbangkan kasus yang dijekaskan pada subjek; a. Prinsip Fisika *Water Hammer* untuk Fluida Tak Termampatkan, dengan asumsi bahwa fluida tak termampatkan yang berbentuk cairan atau *liquid* dapat di mampatkan dengan jumlah satuan tertentu dan penutupan katup pada sistem pipa secara mendadak. Jika nilai kecil kompresibilitas *liquid* di asumsikan, hal ini akan merujuk bahwa perubahan tekanan (P) dan debit *liquid* (Q) yang mengalir dengan kecepatan konstan pada pipa, akan menghasilkan yang disebut sebagai kecepatan gelombang supersonik (c).

Penutupan katup pada waktu  $t = 0$ , menyebabkan kenaikan tekanan  $\Delta P$  pada katup dan penambahan ini akan berbanding lurus dengan kenaikan kecepatan liquid yang menyebabkan kecepatan gelombang supersonik ( $c$ ) dalam arah yang berlawanan dari pada arah aliran awal. Perubahan debit dari awal ( $Q_0$ ) menuju nol dengan kecepatan yang sama, gambar 2.12 menunjukkan bahwa pada keadaan  $t = 0$  (penutupan katup), kenaikan tekanan terjadi secara longitudinal dengan dinyatakan jarak  $\Delta x$ , maka waktu atau periode dapat dinyatakan juga  $t < L/c$  (waktu kurang dari jarak dibagi dengan kecepatan super sonic) dan persamaan ini ditentukan oleh relasi persamaan,

$$\Delta x = c \cdot t \quad (4)$$



Gambar 2.12, Permodelan aliran *compressible liquid* dari sebuah *reservoir* melewati sistem pipa dan terjadi penutupan katup secara mendadak.

Sumber : Zabura, J, Water Hammer in Pipe-Line Systems, hal 24

Perubahan momentum fluida cairan/*liquid* pada wilayah jarak ( $\Delta x$ ) di sistem pipa sama dengan momentum oleh perbedaan tekanan ( $\Delta p$ ) yang

beraksi dari hulu ke hilir selama periode waktu tertentu ( $t$ ). Ini dapat dinyatakan oleh persamaan,

$$A. \Delta x. \rho. \frac{Q_0}{A} = \Delta P. A. t \quad (5)$$

Maka di sederhanakan menjadi,

$$\Delta P = \frac{c. \rho. Q_0}{A} \quad (6)$$

Persamaan di atas masih memiliki 2 variabel ( $\frac{Q_0}{A}$ ) yang mana dapat di sederhanakan dengan menjadikannya kecepatan ( $v$ ) sesuai persamaan kontinuitas fluida.

$$\Delta P = c. \rho. v1 \quad (7)$$

Proses kecepatan gelombang supersonik ( $c$ ) kemudian dalam realitanya mengarah pada hulu sistem pipa, mencapai pada periode waktu  $t = L/c$  (gambar 2.13a). Pada keadaan ini, debit aliran fluida bernilai 0 atau tidak ada dan tekanan ( $\Delta P = + P \leftarrow$ ) secara cepat akan naik pada sistem pipa dikarenakan katup tertutup secara mendadak.

Fluida cairan/*liquid* pada ujung hulu (*reservoir*), bagaimanapun tidak pada keadaan setimbang sehingga tekanan dari kiri atau hulu akan

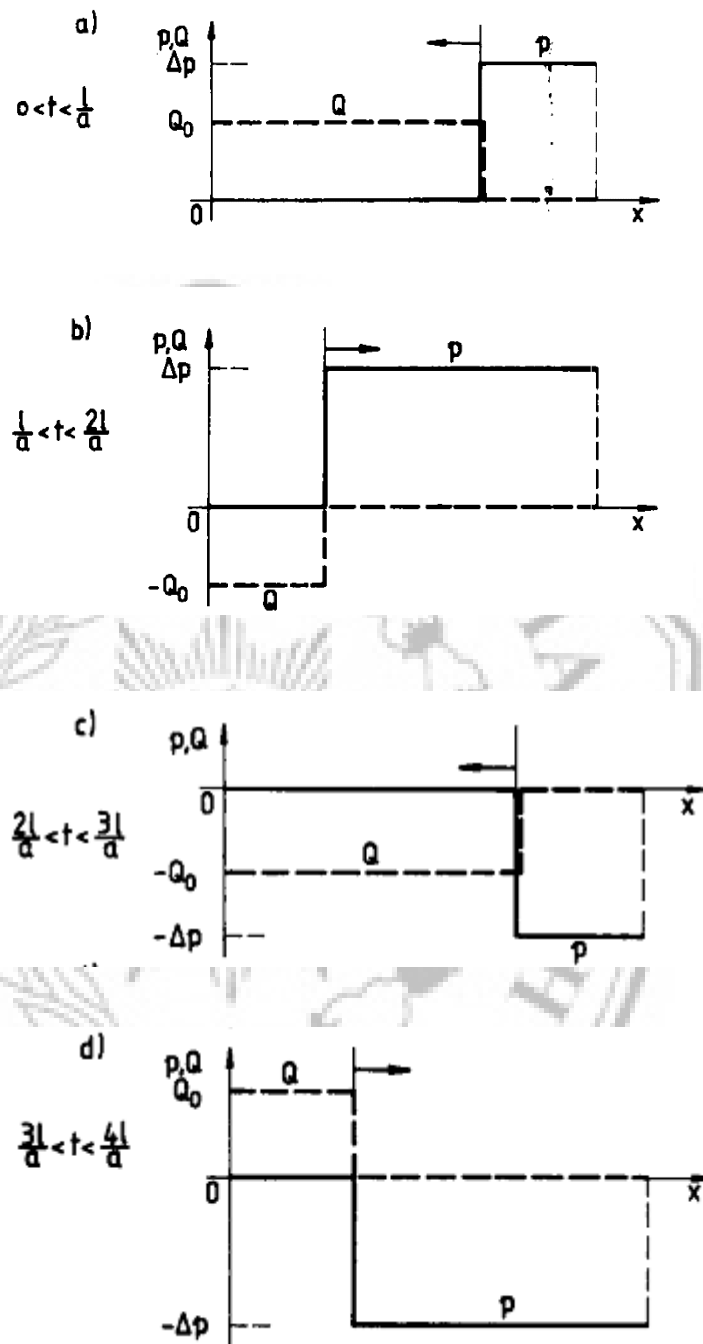
menurunkan tekanan sebelumnya yang datang disebabkan oleh tertutupnya katup secara mendadak, sesuai pada (gambar 2.13b). Fenomena ini akan menyebabkan tekanan drop atau turun drastis menjadi 0 ( $P = 0 \rightarrow$ ) dan debit fluida pada waktu yang sama, karena katup yang di tutup hingga debit mengalir dari katup menuju reservoir atau hilir ke hulu ( $Q = - Q_0 \leftarrow$ ). Kecepatan gelombang akan mencapai katup pada periode waktu  $t = 2L/c$ .

Kemudian pada siklus selanjutnya (gambar 2.13c), debit aliran fluida pada katup kembali ke kondisi tidak stabil. Debit aliran fluida tetap bernilai negatif dan menuju ke arah hulu atau reservoir hingga lama kelamaan menjadi 0 ( $Q = 0$ ). Berbanding lurus dengan debit aliran fluida, tekanan drop dan bernilai negatif dan menuju reservoir atau hulu ( $P = - \Delta P \leftarrow$ ). Kecepatan gelombang supersonik akan mencapai reservoir pada periode waktu  $t = 3L/c$ .

Ketidakseimbangan pada penampang dekat reservoir/hulu sistem pipa membuat tekanan baru yang mengalir menuju ke katup kembali (gambar 2.13d) dimana pada siklus ini, kecepatan gelombang supersonic mencapai periode waktu  $t = 4L/c$ , dimana ( $t=0$ ), ( $P = 0 \rightarrow$ ) dan ( $Q = + Q_0 \rightarrow$ ).

Semua proses ini adalah siklus yang kemudian dapat dirampungkan dengan persamaan,

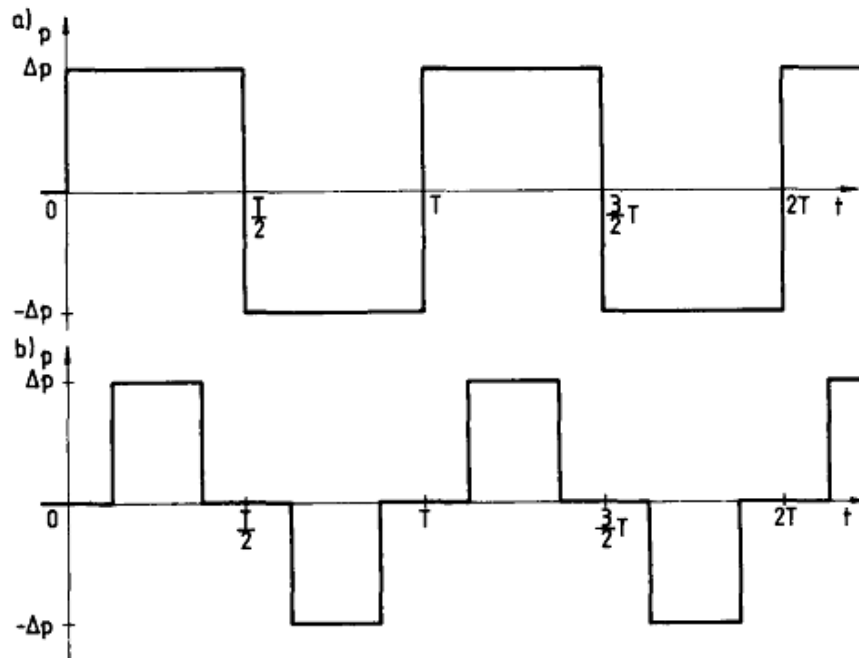
$$T = \frac{4 \cdot L}{c} \quad (8)$$



Gambar 2.13, Siklus perubahan Tekanan (P) dan Debit Aliran (Q) pada sistem pipa yang katupnya ditutup secara mendadak (*short time*).

Sumber : Zabura, J, Water Hammer in Pipe-Line Systems, hal 25





Gambar 2.14, Variasi tekanan ( $\Delta P$ ) sebagai fungsi terhadap periode waktu ( $t$ ),

(a) pada katup; (b) pada titik tengah sistem saluran pipa.

Sumber : Zabura, J, Water Hammer in Pipe-Line Systems, hal 26

### c. Kecepatan gelombang supersonik

Kecepatan gelombang supersonic, dengan sedikit kemampuan kompresibilitas fluida *liquid* dan kekakuan atau rigiditas dari saluran pipa maka hubungan hubungan parameter ini akan membentuk suatu persamaan,

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (9)$$

K adalah modulus bulk fluida,  $\rho$  merupakan massa jenis fluida dan  $c$  adalah kecepatan gelombang supersonic yang ada selama water hammer

terjadi. Tabel 4 di bawah ini adalah angka atau nilai standard dari modulus bulk, massa jenis juga kecepatan gelombang supersonik.

Tabel 2.3: Angka standar modulus bulk (K), massa jenis fluida ( $\rho$ ) dan kecepatan supersonik (c)

Liquid	$K$ (Pa)	$\rho$ ( $\text{kg m}^{-3}$ )	$c$ ( $\text{m s}^{-1}$ )
water 0 °C	$1.89 \times 10^9$	1000	1375
water 10 °C	$1.96 \times 10^9$	1000	1400
water 20 °C	$2.03 \times 10^9$	998	1426
water 40 °C	$2.18 \times 10^9$	992	1482
sea water 0 °C 3.5 % salt	$2.04 \times 10^9$	1028	1408
kerosene	$1.3 \times 10^9$	670–760	1307–1393
petroleum	$1.5 \times 10^9$	830–840	1336–1344
oil	$1.1 \times 10^9$ – $1.6 \times 10^9$	855–963	1134–1288

Di karenakan elastis dari saluran pipa, kecepatan gelombang supersonic dalam pipa dapat terpengaruh dan berkurang dikarenakan kurang kaku atau rigidnya pipa.

Kemudian untuk pipa yang memiliki ketebalan yang tipis, kecepatan gelombang supersonik dalam memiliki persamaan sebagai berikut,

$$c = \sqrt{\frac{K_e}{\rho}} \quad (10)$$

Di mana,

$$K_e = \frac{1}{\frac{1}{K} + \frac{D}{eE}} \quad (11)$$

Di mana e adalah ketebalan dinding saluran pipa dan E adalah modulus elastis bahan dari saluran pipa. Tabel 2.4 memberikan angka angka standar untuk berbagai variasi modulus elastis dari beberapa material.

Tabel 2.4: Modulus elastisitas bahan pada beberapa material.

Conduit material	$E$ (Pa)
steel	$2.0 \times 10^{11} - 2.2 \times 10^{11}$
grey cast iron	$4.4 \times 10^{10} - 1.2 \times 10^{11}$
aluminium	$7.3 \times 10^{10}$
copper	$1.2 \times 10^{11}$
lead	$5 \times 10^9 - 1.7 \times 10^{10}$
glass	$5 \times 10^{10} - 8 \times 10^{10}$
wood	$9 \times 10^9 - 1.3 \times 10^{10}$
rubber	$2 \times 10^5 - 6 \times 10^5$
concrete	$2 \times 10^{10} - 3 \times 10^{10}$
asbestos cement	$2.5 \times 10^{10}$

Kecepatan gelombang supersonik untuk fluida air misalkan ( $K = 1,96 \times 10^9$  Pa,  $\rho = 1000$  kg m<sup>-3</sup>) dalam berbagai jenis material atau bahan, dapat di hitung menggunakan persamaan (10) dan (11). Tabel 2.5 adalah contoh hasil kecepatan gelombang supersonik khusus pada fluida air (Zabura.J; 1993).

Tabel 2.5: Berbagai hasil kecepatan supersonik fluida air, dengan berbagai macam modulus elatisitas bahan.

Conduit material	$D$ (m)	$e$ (m)	$E$ (Pa)	$c$ (m s <sup>-1</sup> )
steel	0.04	0.01	$2.1 \times 10^{11}$	1374
steel	0.12	0.01	$2.1 \times 10^{11}$	1328
steel	0.40	0.01	$2.1 \times 10^{11}$	1195
steel	1.20	0.01	$2.1 \times 10^{11}$	961
steel	0.40	0.005	$2.1 \times 10^{11}$	1059
steel	0.40	0.02	$2.1 \times 10^{11}$	1285
steel	0.40	0.03	$2.1 \times 10^{11}$	1320
cast iron	0.12	0.01	$1.0 \times 10^{11}$	1259
asbestos cement	0.12	0.01	$2.5 \times 10^{10}$	1004
rubber	0.12	0.01	$1.0 \times 10^5$	2.9

## 2.8 Efisiensi Pompa Hidram

Efisiensi pada sebuah instalasi pompa hidram ditentukan oleh berbagai faktor, baik dari dimensi atau bahan yang digunakan untuk membuat pompa hidram serta tergantung dari karakteristik instalasi pompa hidram yang berbeda pada lokasi pemasangan yang diinginkan. Untuk mengetahui efisiensi pompa hidram biasanya dalam penelitian dapat menggunakan dua persamaan efisiensi yaitu efisiensi D'Aubuisson dan efisiensi Rankine.

### 1. Menurut D'Aubuisson

Menurut D'Aubuisson, perhitungan efisiensi pompa hidram berpatokan pada katup limbah untuk digunakan sebagai datum. Efisiensi D'Aubuisson dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$\eta = \frac{q(H + h)}{(Q + q)H} \quad (12)$$

Dimana

$\eta$  = efisiensi pompa hidram (%)

$q$  = debit hasil, (m<sup>3</sup>/s)

$Q$  = debit limbah, (m<sup>3</sup>/s)

$h$  = head keluar, (m)

$H$  = head masuk, (m)

(Michael dan Kheepar, 1997)

## 2. Menurut Rankine

Sedangkan efisiensi menurut Rankine adalah perbandingan antara selisih tinggi tekan isap dan sisi buang yang dikali kapasitas pengisapan dengan tinggi tekan isap dikalikan kapasitas air yang dipindahkan. Efisiensi Rankine dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

(13)

$$\eta = \frac{qh}{QH}$$

Dimana

$\eta$  = efisiensi pompa hidram (%)

$q$  = debit hasil, (m<sup>3</sup>/s)

$Q$  = debit limbah, (m<sup>3</sup>/s)

$h$  = head keluar, (m)

$H$  = head masuk, (m)

(Michael dan Kheepar, 1997)